

유로단면이 변하는 수평관 내 기포류에서의 기포 및 액체 속도

찬탄째^{*,**} · 김병재^{***} · 박현식^{*,**†}

Bubble and Liquid Velocities for a Bubbly Flow in an Area-Varying Horizontal Channel

Tran Thanh Tram^{*,**}, Byoung Jae Kim^{***} and Hyun Sik Park^{*,**†}

Abstract The two-fluid equations are widely used to simulate two-phase flows in a nuclear reactor. For the two-fluid momentum equation, the wall and interfacial drag terms play an important role in predicting a two-phase flow behavior. Since the bubble density is much smaller than the water density, the bubble accelerates faster than the liquid in a nozzle. As a result, the bubble phase becomes faster than the liquid phase in the nozzle. In contrast, the opposite phenomena occur in the diffuser. The purpose of our study is to experimentally show these behaviors in an area-varying channel such as nozzle and diffuser. Experiments were made of turbulent bubbly flows in an area-varying horizontal channel. The velocities of the bubble and liquid phases were measured by the PIV technique. It was shown that the two-phase velocities were no longer close to each other in the area-varying regions. The bubble was faster than the liquid in the nozzle; in contrast, the bubble was slower than the liquid in the diffuser. Code simulations were also performed using the MARS code. By replacing the original wall drag model in the MARS code with Kim (1)'s wall drag partition model, we obtained the simulation results being consistent with experimental observations.

Key Words : Horizontal Bubbly Flow(수평 기포류), Two-Fluid Equation(2유체 방정식)

1. 서론

2상유동 해석에 널리 사용되는 2유체 방정식(two-fluid equation)은 모든 상을 연속상으로 가정하고 평균 과정을 통해 얻어진 방정식이다. 따라서 2유체 방정식에 존재하는 모델 항은 2상유동을 해석하는데 매우 중요한 역할을 한다.

비압축이며 상변화가 없는 경우 k 상에 대한 간단한 형태의 2유체 운동량 방정식은 다음과 같다.

† Thermal Hydraulics and Severe Accident Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
E-mail: hspark@kaeri.re.kr

* Thermal Hydraulics and Severe Accident Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
** Advanced Nuclear System Engineering, Korea University of Science and Technology

*** School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial u_k}{\partial t} + \alpha_k \rho_k u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - C_{wk} |u_k| u_k - C_i |u_R| u_R - \alpha_k \rho_k g \quad (1)$$

여기서 α , ρ , u 는 각각 상분율, 밀도, 속도이며, g 는 중력가속도이다. C_{wk} 와 C_i 는 각각 k 상의 벽면마찰계수, 두 상간의 계면마찰계수이다. u_R 은 두 상간의 상대속도이다. 따라서 2유체 운동량 방정식에서는 계면마찰과 벽면마찰이 중요한 모델 항이라 할 수 있다.

분산유동이란 기포류와 액적류와 같이, 분산상 (dispersed phase)과 연속상(continuous phase)으로 이루어진 2상유동을 말한다. 2유체 방정식은 모든 상을 연속상으로 가정하기 때문에, 1차원 2유체 운동량 방정식에서 분산상에 대한 벽면마찰의 물리적 의미가 명확하지 않았다. 또한 대부분의 1차원 2상유동 코드들은 분산상이 벽과 접촉하지 않는다는 사실에 기반하여 분산상에 작용하는 벽면마찰을 고려하지 않는다(Bestion (2), Paik (3), USNRC (4)). 그러나 Kim (1)과 Kim (5)는 분산상에 벽면마찰을 주지 않았을 때 단면적이 일정한 수평유로 내 수평 완전발달 난류 기포류에서 기포 속도가 액체 속도보다 빠르게 예측됨을 보였다. 그리고 이를 해결하기 위해 2상유동 전체에 작용하는 벽면마찰을 각 상의 분율에 비례하여 각 상에 배분되어야 함을 이론적으로 보였다. 다시 말하면 분산상이 벽면에 접촉하지 않더라도 분산상에 벽면마찰을 부여해야 한다.

기포 밀도는 물 밀도보다 작기 때문에, 속도가 증가하는 노즐(nozzle)에서는 기포가 물 보다 더 빨라지고, 속도가 감소하는 디퓨저(diffuser)에서는 기포가 물 보다 느려진다. Kim (1)의 벽면마찰 모델을 사용하면 1차원 2상유동에서 이러한 현상을 예측할 수 있다.

본 연구의 목적은 Kim (1)이 제시한 벽면마찰 모델을 사용하였을 때 예측되는 현상을 실험적으로 확인하는데 있다. 기존의 수평 기포류 실험은 단면적이 일정한 유로에서 수행되었다(Bottin (6), Kocamustafaogullari (7-9), Kong (10), Talley (11)).

2. 실험 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 유로의 전체 모습을 보여준다. 유로의 총 길이는 2,000 mm이며 너비는 전체에 걸쳐 40 mm이다. 하단 그림은 유로 단면적이 변하는 주요 시험부를 보여준다. 유로 높이는 입구에서 40 mm이나, 노즐을 통과하면서 높이가 20 mm로 줄어들고, 디퓨저를 지나면서 유로 높이가 다시 40 mm가 된다. 시험부는 유동가시화를 위해 아크릴로 제작되었다. 레이저는 유로 단면의 중앙부분을 수직으로 조명한다.

Fig. 2는 기포 및 물 속도 측정 시스템의 개략도를 보여준다. 유로 입구에서 물의 평균 유속은 5.0 m/s 또는 5.9 m/s이다. 이는 레이놀즈 수로 각각 200,000과 236,000에 해당된다. 따라서 유동은 난류유동이다. 소량의 공기를 유로에 주입하여 유로

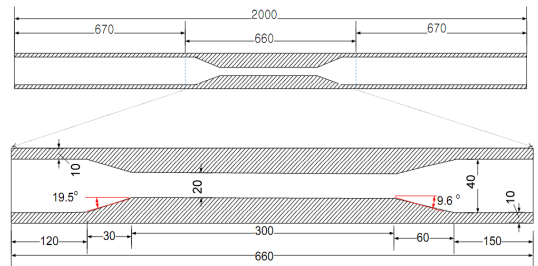


Fig. 1. Schematic diagram of the horizontal test channel.

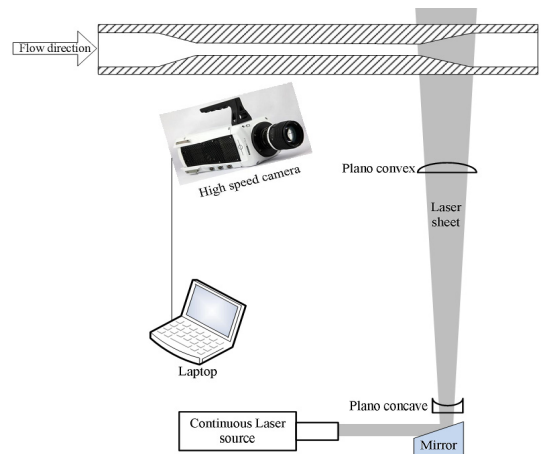


Fig. 2. Schematic diagram of the measurement system.

내 기포율은 0.01 보다 작다. 낮은 기포율을 사용한 이유는 입자운동방정식에 기반한 벽면마찰 모델이 낮은 기포율 유동에 유효하기 때문이다 (Crowe (12), Kim (1), Prosperetti (3)). 또한 기포율이 높은 경우, 디퓨저 영역에서 유동이 매우 복잡해져서 유동이 이상적인 기포류가 아닐 수 있기 때문이다.

물 속도를 측정하기 위해 직경 10 μm 추적입자를 사용하였다. 측정 위치는 노즐 구간과 디퓨저 구간이다. 추적입자와 기포 영상을 고속 카메라를 이용하여 10,000 fps 속도로 얻었다. 기포 영상과 추적입자 영상을 분리하기 위해 영상처리 기법을 사용하였다. 입자영상을 이용하여 물에 대한 속도장을 얻고, 기포영상을 이용하여 기포 속도를 얻었다. 영상처리는 Dantec Dynamic Studio 소프트웨어를 사용하였다.

3. 실험결과

Fig 3은 레이놀즈 수가 200,000 일 때 노즐 구간에서 측정된 속도 변화를 보여준다. 그래프에서 $x = 25 \sim 55 \text{ mm}$ 구간에서 유로 단면적이 작아진다. 그래프에서 각 위치의 속도는 유로 단면에서 주 유동 방향 평균속도를 시간 평균한 값이다. 보는 바와 같이 유로 단면적이 작아지는 구간에서 기포 속도가 물 속도보다 빠름을 알 수 있다. 이는 기포 상과 물 상에 동일한 압력강하가 가해졌을 때, 기포 밀도가 물 밀도보다 작아 기포가 물 보다 더 빨리 가속되기 때문이다.

$x \geq 55 \text{ mm}$ 구간에서는 유로 단면적이 다시 일정하다. 이 영역에서는 기포와 물의 속도는 다시 같아짐을 알 수 있다. Fig. 4는 $\text{Re}=236,000$ 일 때 결과를 보여준다. 전반적인 결과는 Fig. 3과 유사하다.

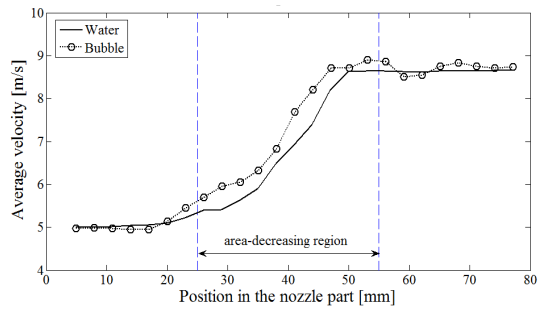


Fig. 3. Velocity variations along the downstream in the nozzle. $\text{Re}=200,000$.

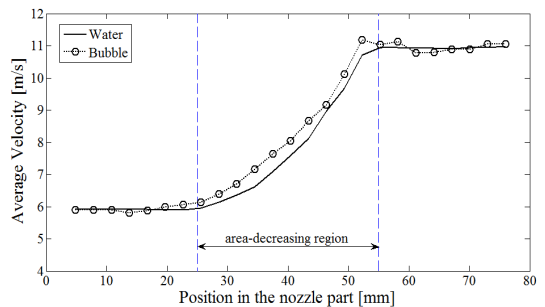


Fig. 4. Velocity variations along the downstream in the nozzle. $\text{Re}=236,000$.

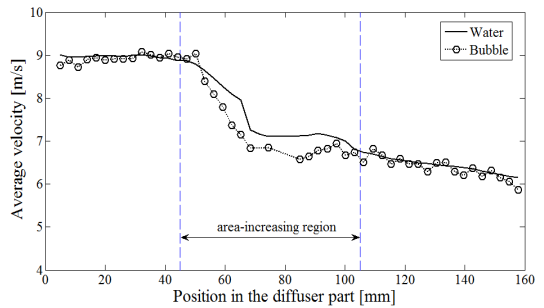


Fig. 5. Velocity variations along the downstream in the diffuser. $\text{Re}=200,000$.

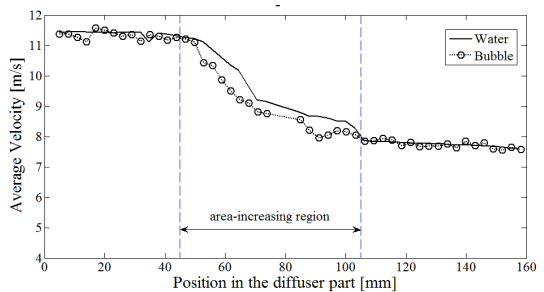


Fig. 6. Velocity variations along the downstream in the diffuser. $\text{Re}=236,000$.

Fig. 5와 6은 디퓨저 근처에서 레이놀즈 수가 각각 200,000과 236,000일 때 결과를 보여준다. 그래프에서 $x = 45 \sim 105 \text{ mm}$ 구간은 유로 단면적이 증가하는 영역이다. 유로 단면적이 일정한 $x \leq 45 \text{ mm}$ 구간에서는 물 속도와 기포 속도가 거의 같게 측정되었다. 그러나, 유로 단면적이 증가하는 구간에서는 물 속도가 기포 속도보다 빠르게 측정되었다. 이는 기포 밀도가 물 밀도보다 작아, 두 상에 동일한 역압력이 가해졌을 때, 기포 속도가 공간상에서 더 빨리 감소되기 때문이다.

Fig. 5와 6에서 $x \geq 105 \text{ mm}$ 구간에서 기포 속도와 물 속도가 거의 같지만 그 값이 하류로 갈수록 감소함을 볼 수 있다. 이 구간에서는 유로 단면적이 일정하나, 디퓨저 이후 유동이 발달과정에 있는 것으로 생각된다. 디퓨저 영역에서 유동박리현상이 발생할 수 있어서 $x \geq 105 \text{ mm}$ 영역에서는 유동이 매우 복잡하여 유동이 완전발달되기까지 충분한 거리가 필요하다. 이러한 이유로 인하여, 속도 변화 곡선은 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타난 곡선만큼 부드럽지 않다.

본 실험을 통해 유로 단면적이 감소하는 노즐 영역에서는 기포 속도가 물 속도보다 빠르고, 반대로 디퓨저 영역에서는 기포 속도가 물 속도보다 느림을 실험적으로 확인하였다.

4. MARS 코드 해석 결과

MARS 코드는 국내 원전의 인허가 심사에 사용되는 원자로 해석 코드로, 원자로 내 2상유동을 1차 원으로 해석할 수 있다(Chung (14-15)). 이 코드의 주요 대상은 경수로 및 중수로이나, 2상유동을 다루는 일반 열유체시스템 해석에도 사용될 수 있다.

MARS코드의 1차원 벽면마찰 모델을 평가하기 위하여 본 실험을 모의하였다. 2상유동 벽면마찰 모델은 부록 A에 기술되어 있다. 그림 7은 MARS 코드 해석을 위한 수평 유로에 대한 노딩 다이어그램을 보여준다. 유로는 총 23 개의 노드로 구성되어 있다. 노드 8은 유로 단면적이 감소하는 노즐에 해당하고, 노드 15와 16은 유로 단면적이 증가하는 디퓨저에 해당한다. 입구에서의 기포 및 물의

속도는 실험과 같은 값을 주었다. 입구 기포율의 경우 실험에서는 0.01보다 작은 값으로 추정된다. 해석에서는 입구 기포율을 0.01으로 설정하였다. 해석의 주요 목적은 기포율을 예측하는 것이 아니라 속도를 예측하는 것이므로, 기포율이 매우 낮으면 속도를 예측하는데 문제가 없다. 그 이유는 기포 속도는 기포율보다 기포 직경에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

레이놀즈 수가 다른 두 실험에 대하여 각각 해석을 수행하였다. Fig. 8은 레이놀즈 수가 200,000

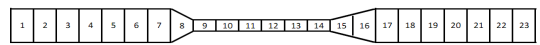


Fig. 7. Nodding diagram for MARS code simulation.

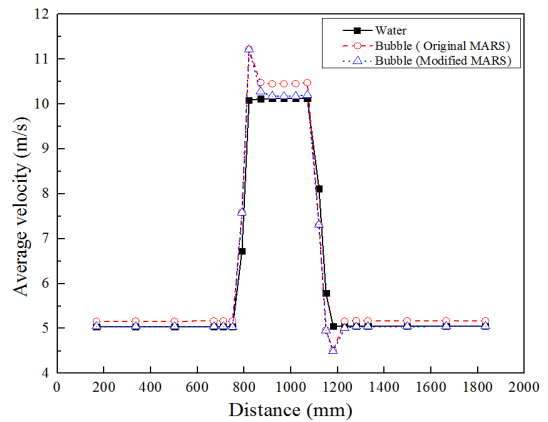


Fig. 8. Simulation result for Re=200,000.

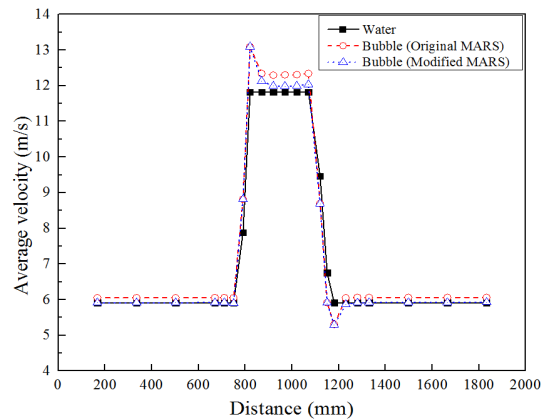


Fig. 9. Simulation result for Re=236,000.

일 때 해석 결과를 보여준다. 그림에서 원 기호는 원래의 MARS 코드 벽면마찰을 사용하였을 때 결과이고, 삼각형 기호는 MARS코드의 벽면마찰 모델을 Kim (1)이 제시한 모델로 수정했을 때 결과이다. MARS 코드의 벽면마찰 모델은 유로 단면적이 일정한 구간에서 기포 속도를 물 속도보다 빠르게 예측하고 있다. 이는 실제 물리적 현상과 다르기 때문에 타당하지 않다. 그러나 Kim (1)이 제시한 모델을 사용하면 유로 단면적이 일정한 구간에서 두 상의 속도가 같아짐을 확인할 수 있다. Kim (1)의 벽면마찰 모델은 부록 B에 기술되어 있다. MARS 벽면마찰 모델은 2상유동 전체에 대한 벽면마찰을 각상의 접수길이(wetted perimeter) 개

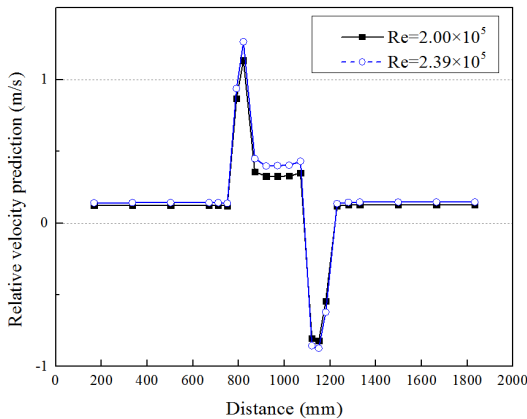


Fig. 10. Comparison of the relative velocity between two phases using original MARS model.

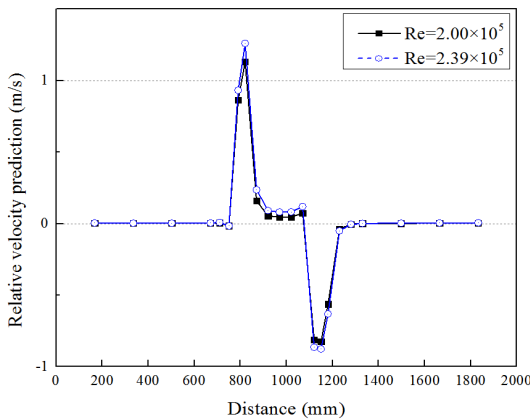


Fig. 11. Comparison of the relative velocity between two phases using Kim's model.

념을 바탕으로 각 상에 배분한다. 기포는 벽과 접촉하지 않음에도 불구하고 기포상에 접수길이 개념을 적용하는 것은 타당하지 않다. 반면, Kim 모델은 2상유동 전체에 대한 벽면마찰을 각 상의 비율에 비례하여 각 상에 배분한다. Kim 모델은 입자유동방정식을 바탕으로 하고 있으므로 더 타당하다고 할 수 있다.

한편, 실험결과에 의하면 노즐 구간에서는 기포 속력이 물 속력보다 빠르고, 디퓨저 구간에서는 기포 속력이 물 속력보다 느렸다. 그림 8과 9에서 보는 바와 같이, Kim 벽면마찰 모델은 이러한 경향을 잘 예측하고 있다.

Fig. 10은 MARS 벽면마찰 모델을 사용했을 때 결과로, 유로의 위치에 따라 기포 속도에서 물 속도를 뺀 값을 그린 것이다. 보는 바와 같이 기존의 벽면마찰 모델은 유로 단면적이 일정한 구간에서 기포 속도가 물 속도보다 높게 예측하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 Kim의 벽면마찰 모델을 사용한 결과를 보여준다. 유로 단면적이 일정한 영역에서 두 상의 속도가 거의 같게 예측되고 있다. 뿐만 아니라 실험에서 관측된 현상과 유사하게, 물에 대한 기포의 상대 속도가 노즐 부분과 디퓨저 부분에서 잘 예측되고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, Kim의 벽면마찰 모델이 본 연구에서 수행한 실험 경향을 잘 예측한다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 1차원 2유체 운동량 방정식에 사용되는 벽면마찰 모델을 검증하기 위해 수평 난류 기포류 실험을 수행하였다. 그 결과 유로 단면적이 작아지는 영역에서는 기포 속력이 물 속력 보다 빠르고, 유로 단면적이 증가하는 영역에서는 기포 속력이 물 속력 보다 느려졌다. MARS 코드 해석을 통해 Kim (1)의 벽면마찰 모델이 이 현상을 잘 예측함을 보였다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(No. 2016M2C6A1004894).

REFERENCE

- 1) Kim, B. J., Kim, J. W., and Kim, K. D., 2014, "On the Wall Drag Term in the Averaged Momentum Equation for Dispersed Flow," Nuclear Science and Engineering, Vol. 178, pp.225~239.
- 2) Bestion, D., 1990, "The Physical Closure Laws in the CATHARE Code," Nuclear Engineering and Design Vol. 124, pp.229-245.
- 3) Paik, C. Y., Hochreiter, L. E., Kelly, J. M., Kohrt, R. J., 1985, Analysis of FLECHT-SEASET 163-Rod Blocked Bundle Data Using COBRA-TF, Westinghouse Electric Corporation, USA.
- 4) USNRC, 2013, TRACE V5.840 Theory manual: Fields equations, solution methods, and physical models, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA.
- (5) Kim, B. J., Lee, S. W., Kim, K. D., 2015, "New wall drag and form loss models for one-dimensional dispersed two-phase flow," Nuclear Engineering and Technology, Vol. 47, pp.416-423.
- (6) Bottin, M., Berlandis, J. P., Hervieu, E., Lance, M., Marchand, M., Öztürk, O. C., Serre, G., 2014, "Experimental investigation of a developing two-phase bubbly flow in horizontal pipe," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 60, pp.161-179.
- (7) Kocamustafaogullari, G., Huang, W. D., 1994, "Internal Structure and Interfacial Velocity Development for Bubbly Two-Phase Flow," Nuclear Engineering and Design, Vol. 151, pp.79-101.
- (8) Kocamustafaogullari, G., Huang, W. D., Razi, J., 1994, "Measurement and modeling of average void fraction, bubble size and interfacial area," Nuclear Engineering and Design, Vol. 148, pp.437-453.
- (9) Kocamustafaogullari, G., Wang, Z., 1991, "An Experimental Study on Local Interfacial Parameters in a Horizontal Bubbly Two-Phase Flow,"

International Journal of Multiphase Flow, Vol. 17, pp.553-572.

- (10) Kong, R., Kim, S., 2017, "Characterization of horizontal air-water two-phase flow," Nuclear Engineering and Design, Vol. 312, pp.266-276.
- (11) Talley, J. D., Worosz, T., Kim, S., 2015, "Characterization of horizontal air-water two-phase flow in a round pipe part II: Measurement of local two-phase parameters in bubbly flow," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 76, 223-236.
- (12) Crowe, C., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., Tsuji, Y., 2011, Multiphase Flows with Droplets and Particles, 2nd ed. CRC Press, New York, USA.
- (13) Prosperetti, A. and Jones, A.V., 1984, "Pressure Forces in Disperse Two-Phase Flow," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 10, pp.425-440.
- (14) Chung, B. D., 2010, "MARS Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods, KAERI/TR-2812/2004.
- (15) Chung, B. D., 2010, "MARS Code Manual Volume V: Models and Correlations, KAERI/TR-3872/2000.
- (16) Claxton, K.T., Collier, J.G., Ward, J.A., 1972, H.T.F.S. Correlations for Two-phase Pressure Drop and Void Fraction in Tubes. Heat Transfer and Fluid Flow Service.

부록 A MARS 코드 벽면 마찰 모델

식 (1)에서 보는 바와 같이 각 상에 대한 운동량 방정식은 벽면마찰 항을 가지고 있다. k 상에 작용하는 단위 부피당 벽면마찰력 $C_{wk} |u_k| u_k$ 을 결정하기 위한 첫 단계는 2상유동 전체에 작용하는 벽면마찰이다. 이 값은 다음 상관식으로 계산된다.

$$\left(-\frac{dp}{dx} \right)_{2\phi} \equiv \alpha_g \rho_g C_{wg} |u_g| u_g + \alpha_f \rho_f C_{wf} |u_f| u_f$$

$$= \frac{1}{2D} \left\{ \begin{aligned} & \lambda'_f \rho_f (\alpha_f u_f)^2 \\ & + C \left[\lambda'_f \rho_f (\alpha_f u_f)^2 \lambda'_g \rho_g (\alpha_g u_g)^2 \right]^{1/2} \\ & + \lambda'_g \rho_g (\alpha_g u_g)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서 하침자 g 와 f 는 각각 기포 상과 액체 상을 의미한다. λ' 은 Darcy-Weisbach 마찰계수로, λ'_g 와 λ'_f 는 각각 다음의 레이놀즈 수를 기반으로 계산된다.

$$\text{Re}_f = \frac{\alpha_f \rho_f u_f D}{\mu_f} \quad (3)$$

$$\text{Re}_g = \frac{\alpha_g \rho_g u_g D}{\mu_g} \quad (4)$$

여기서 D 와 μ 는 각각 유로의 수력직경과 유체의 점성계수이다. 식 (2) 에서 C 는 다음과 같이 계산된다(Claxton (16)).

$$C = -2 + (28 - 0.3\sqrt{G}) \exp\left[-\frac{(\log_{10} \Lambda + 2.5)^2}{2.4 - 10^{-4}G}\right] \quad (5)$$

여기서

$$\Lambda = \frac{\rho_g}{\rho_f} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g}\right)^{0.2} \quad (6)$$

$$G = \alpha_f \rho_f u_f + \alpha_g \rho_g u_g \quad (7)$$

다음 단계에서는 식 (2) 에서 계산된 2상유동 전체에 작용하는 벽면마찰을 각 상에 배분한다. MARS 코드는 다음의 벽면마찰 배분 방법을 사용한다.

$$C_{wk} |u_k| u_k = \frac{P_k \lambda_k \rho_k u_k^2}{P_g \lambda_g \rho_g u_g^2 + P_f \lambda_f \rho_f u_f^2} \left(-\frac{dp}{dx}\right)_{2\phi} \quad (8)$$

여기서 P_k 는 k 상의 접수둘레(wetted perimeter)이다. λ_k 는 k 상에 대한 Darcy-Weisbach 마찰계수로 다음의 레이놀즈 수를 기반으로 계산된다.

$$\text{Re}_k = \frac{\rho_k u_k D_{hk}}{P_k} \quad (9)$$

여기서 D_{hk} 는 다음과 같이 정의된다.

$$D_{hk} = \frac{4A_k}{P_k} \quad (10)$$

A_k 는 유로 단면에서 k 상이 차지하는 면적이다. 위 식에서 보는 바와 같이 P_k 가 k 상에 작용하는 벽면마찰에 큰 영향을 가지고 있다. 분산상은 물리적으로 벽면에 접촉하지 않기 때문에 분산상에 대한 P_k 는 0이 되어야 한다. 기포류의 경우 $P_g = 0$ 이다. 그러나 MARS의 경우에는 $P_k = \alpha_k P$ 로 모델링하고 있다. 여기서 P 는 유로의 둘레길이다. 기포류의 경우 $P_g = \alpha_g P$, $P_f = \alpha_f P$ 로 설정하고 있다.

부록 B Kim (1) 벽면마찰 배분 모델

Kim (1)은 입자유동에 대한 2유체 운동량 방정식부터 1차원 운동량 방정식의 벽면마찰 항은 다음과 같아야 함을 보였다.

$$C_{wk} |u_k| u_k = \alpha_k \left(-\frac{dp}{dx}\right)_{2\phi} \quad (11)$$